DOCUMENTS DE RECHERCHE DE L'OBSERVATOIRE
DE LA FRANCOPHONIE ÉCONOMIQUE
DROFE

DROFE no. 23

INCIDENCE DES FACTEURS SOCIO-ÉCONOMIQUES SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES PAYS DU BASSIN DU CONGO

Donald Dimitri ONOUNGA

Enseignant-chercheur, Faculté des Sciences Economiques, Université Marien Ngouabi de Brazzaville

SEPTEMBRE 2021

OBSERVATOIRE
DE LA FRANCOPHONIE
ÉCONOMIQUE



Université
de Montréal

VISIT…

LANZAROTE

Caliente.COM

Observatoire de la Francophonie économique de l’Université de Montréal

L’Observatoire de la Francophonie économique (OFE) de l’Université de Montréal a été créé en 2017 en partenariat avec le Gouvernement du Québec, l’Organisation internationale de la Francophonie (OIF) et l’Agence Universitaire de la Francophonie (AUF). Il a pour mission de devenir une ressource de premier plan sur les questions reliées à la Francophonie économique et, donc, un centre de calibre international d’études, de recherches et d’activités de liaison et de transfert sur la francophonie économique ayant un intérêt marqué pour les pays en voie de développement, notamment ceux du continent africain.

Il met à la disposition des partenaires de la francophonie – gouvernements, entreprises et organismes publics et privés – des études de haut niveau, des données fiables et un vaste réseau d’expertises économiques vouées à la réalisation d’analyses économiques résolument ancrées dans la théorie et les faits.

Pour plus d’information, visitez le site : http://ofe.umontreal.ca

Merci aux partenaires de l’OFE :







Incidence des facteurs socio-économiques sur le changement climatique dans les pays du bassin du Congo



DROFE no. 23

Donald Dimitri ONOUNGA
Enseignant-chercheur, Faculté des Sciences Economiques
Université Marien Ngouabi de Brazzaville

Septembre 2021

Résumé : Cet article analyse l'incidence des facteurs socio-économiques sur le changement climatique dans les pays du Bassin du Congo. Nous utilisons un modèle à équations simultanées appliquées aux données d'un échantillon comprenant six (6) pays pour la période allant de 1985 à 2018. Les résultats révèlent que : la croissance démographique, la croissance économique mondiale et les superficies forestières de ces pays favorisent le changement climatique à travers des émissions de CO_2 dans les pays du Bassin du Congo. Par ailleurs, cette étude montre que les facteurs socio-économiques affectent négativement les températures et les précipitations seulement par l'intermédiaire de l'augmentation des émissions de CO_2. Finalement, il apparait nécessaire pour les pays du Bassin du Congo de viser dans le long terme, un développement économique sans risque de dégradation environnementale. Promouvoir les activités économiques en parfaite harmonie avec l'économie verte serait indispensable compte tenu des objectifs du développement durable dans les pays du Bassin du Congo.

Mots clés : Socio-économique, changement climatique, Bassin du Congo

L'auteur remercie les évaluateurs anonymes pour leurs observations et suggestions. Les idées exprimées dans ce document sont celles de l'auteur et ne reflètent pas celles de l'OFE ou de ses partenaires. Les erreurs et lacunes subsistantes de même que les omissions relèvent de la seule responsabilité de l'auteur.

Introduction

Le réchauffement climatique est devenu l'un des sujets de préoccupation mondiale qui touche déjà toutes les régions de la planète de multiples façons (GIEC, 2021), où les rapports entre les activités humaines et leur environnement sont abordés sous le concept de développement soutenable (Commission mondiale de l'environnement et du développement, 1987 ; Nordhaus, 2019). Ce développement tient compte des interactions entre les trois piliers économiques, sociaux et écologiques afin de conduire à long terme la société vers un sentier de croissance viable. A cet effet, il est constaté qu'après trois (3) années de stabilisation, les émissions de CO_2 repartent à la hausse (COP 23, 2017)[1]. Ce CO_2 est le gaz carbonique d'origine humaine responsable d'un peu plus de 55 % de l'effet de serre (ensemble de différents gaz naturels) additionnel dû à l'homme. L'augmentation de la concentration de ces différents gaz naturels dans l'atmosphère terrestre est également l'un des facteurs à l'origine du réchauffement climatique. Quatre postes émetteurs sont une cause principale de cette augmentation des émissions du CO_2, à savoir : l'approvisionnement énergétique, l'industrie, la déforestation et le transport (GIEC, 2018 ; GIEC, 2021).

[1] 23e Conférence des Nations-Unies sur les Changements Climatiques tenue à Bonn en Allemagne

Or selon Hope (2009), les pays en développement vont payer le grand prix des dommages causés par le changement climatique. C'est ainsi qu'à long terme, les changements climatiques vont changer les tendances des progrès économiques (Banque Mondiale, 2010). Ce phénomène revêt un regain d'intérêt dans le domaine des sciences sociales en général et des sciences économiques de façon particulière.

Historiquement, sur le plan théorique, la prise en compte du changement climatique et des facteurs le déterminant a connu son émergence, depuis 1980, face à l'accélération de la dégradation de l'environnement (Hugon, 2005). S'y ajoute l'analyse par Nordhaus (1977, 2010) de la relation entre le changement climatique et les différents secteurs de l'économie. Il va proposer la notion de Back-stop technique et expliquer, que la concentration des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère était la question environnementale qui devrait être prise très au sérieux. Par ailleurs, l'énergie, la déforestation et l'agriculture sont les activités économiques qui impactent le changement climatique. Parmi ces activités, l'énergie s'avère la plus prédominante dans le rejet des émissions de CO_2 vu son implication dans le développement économique. Ensuite, il s'est lancé dans l'analyse économique du climat en proposant ainsi une analyse coût-avantage (ACA) dans le calcul économique.

A cet effet, depuis les accords du protocole de Kyoto auquel les pays du Bassin du Congo[2] adhèrent, il va naître une portée économique sur le marché carbone, à savoir : les marchés régulés et contraignants et les marchés volontaires en faisant payer au pollueur les taxes carbones et en faisant bénéficier au non-pollueur les crédits carbones, par rapport à leur plafond des quotas d'émissions de gaz à effet de serre. Dans le même volet à la COP 21 en 2015 à Paris, il était question, pour les pays industrialisés de financer le développement des pays en développement et de mettre en œuvre le projet d'électrification des pays africains où la transition énergétique est lente, afin qu'ils s'adaptent aux différents effets du changement climatique à l'avenir, car ils seront les plus touchés.

Ainsi, s'intéresser à l'analyse de l'incidence des facteurs socio-économiques sur le changement climatique apparaît important à plus d'un titre. Le changement climatique est un phénomène qui se caractérise par la montée des températures moyennes des eaux, une modification des régimes de précipitations, une augmentation de la probabilité d'événements extrêmes (tempêtes tropicales, ouragans etc.) et des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère sur plusieurs années à l'échelle mondiale (Nordhaus, 2019 ; GIEC, 2021). De plus, depuis 1990 les questions sur le lien entre les facteurs socio-économiques et la dégradation de l'environnement dans les pays du Bassin du Congo sont considérées comme un enchaînement inéluctable dû à l'accroissement démographique rapide. Or, le Bassin du Congo affiche une évolution décroissante des superficies forestières passant de 255, 249, 246, 243 à 240 millions d'hectares de forêts, respectivement dans les années 1990, 2000, 2005, 2010 et 2015 due à leurs efforts consacrés dans la gestion du deuxième poumon mondial et ce, sans compensation. Les pays du Bassin du Congo ont un niveau de pauvreté élevé, qui se situe autour de 55,17 %, en moyenne, expliquant ainsi, le niveau du PIB par habitant moyen de 8 566,35 USD sans oublier un taux de croissance économique moyen de -1,43 % pour ces pays (WDI, 2019).

Parallèlement à cette évolution baissière des surfaces forestières, les émissions du CO_2, après une moyenne annuelle de 1,083 tonne métrique en 1985, vont connaitre une augmentation successive de 0,282 et 0,13 tonne métrique respectivement dans les années 1985-1995 et 2005-2015. Alors que, les températures n'étaient en moyenne que de 24°C à 25°C et les précipitations recueillies de 1,92 mm et 1,39 mm respectivement pour les mêmes périodes, la température atmosphérique de surface moyenne par année dans la sous-région a augmenté de 1°C entre 1991 et 2017, augmentera de 1,1°C en 2050 et de 3°C en 2100 (de Wasseige et al., 2016 ; GIEC, 2018). Dans le même volet, ces pays affichent, de façon individuelle, les émissions de CO_2 à la hausse respectivement de 0,20 à 0,30 ; 0,17

[2] Cameroun, Centrafrique, Congo, Démocratique du Congo, Guinée Equatoriale, Gabon

à 0,26 ; 0,13 à 0,22 et 0,01 à 0,04 en tonne métrique par habitant pour le Cameroun, la Centrafrique, le Congo et la RDC ; mais au Gabon et en Guinée Equatoriale, il y a des évolutions en dents de scie de ces émissions du CO_2.

Dès lors, la situation des facteurs socio-économiques dans les pays du Bassin du Congo soulève plusieurs préoccupations. La première porte sur le rythme de croissance de la population où, elle est évaluée à plus de 118,6 millions de personnes en 2017. La deuxième préoccupation tient du fait que le développement des pays du Bassin du Congo est conditionné par l'exploitation des ressources et la dégradation de l'environnement. Ainsi, en ayant tous en objectif l'émergence, il est indispensable de se préoccuper du sort des facteurs socio-économiques et des effets éventuels sur le climat. Mais, par le fait d'adhérer aux différentes initiatives sur la protection de l'environnement (la troisième préoccupation), les pays du Bassin du Congo sont engagés également dans une gestion durable des forêts. Une telle option peut-être porteuse d'espoir pour leurs économies et la lutte contre le changement climatique. Toutes ces préoccupations intègrent la problématique de cet article qui se résume à la question suivante : quelle est l'incidence des facteurs socio-économiques sur le changement climatique ? Ainsi, analyser la nature de l'incidence des facteurs socio-économiques sur le changement climatique représente l'objectif assigné à cet article.

Dans la suite de cet article : la revue de la littérature constitue la première section ; la méthodologie fait partie de la deuxième section ; la présentation et l'interprétation des résultats font l'objet de la troisième section et enfin, la quatrième section porte sur la conclusion et les implications de politiques économiques.

1. Les facteurs socio-économiques et le changement climatique dans la Littérature économique

La littérature économique de l'incidence des facteurs socio-économiques sur le changement climatique aborde à la fois les aspects théorique et empirique, bien que la majorité des travaux ait été toujours consacrée à la vérification de l'hypothèse de la Courbe en U-inversé entre la croissance économique et les indicateurs de dégradation environnementale (Grossman et Krueger, 1995 ; Shafik et Bandyopadhyay, 1992).

Théoriquement, il sera développé ici, la controverse portant sur le modèle de développement actuel à savoir le développement soutenable où il y a le développement soutenable faible (Nordhaus, 1977) et le développement soutenable fort (Daly, 1991). Il est à noter que l'analyse de l'incidence des facteurs socio-économiques sur le changement climatique ou de la dégradation environnementale est devenue un sujet très passionnant dans la littérature économique. Pour commencer, les théories des économistes néoclassiques en matière de soutenabilité faible, apportent des éléments de réponse à cette question du développement durable. Les théories de l'allocation des ressources ou ressources naturelles, de l'externalité, de la gestion des biens communs internationaux ainsi que de l'analyse coût-avantage, offrent des principes économiques sur la manière dont on doit utiliser ou conserver les ressources, et sur les niveaux de pollution optimaux (Hotelling, 1931 ; Pigou, 1958 ; Hardin, 1968 ; Solow, 1974 ; Nordhaus, 1977 ; Hanley et al, 2013). Cet ensemble des théories sont accompagnées d'un certain nombre de critiques de la part des économistes écologiques par l'approche de la soutenabilité forte.

En matière de l'allocation des ressources, les néoclassiques pensent qu'il n'est pas nécessaire de conserver le capital naturel, car d'après le modèle d'Hotelling (1931), les biens de la nature (ressources naturelles et services environnementaux) sont assimilables au capital naturel qui est considéré à la fois comme un facteur de production ou comme une fonction d'utilité. Ensuite, vient s'ajouter à ces arguments néoclassiques la règle d'Hartwick découlant d'un principe expliquant la constance ou l'augmentation de la consommation, avec l'épuisement des ressources renouvelables ou

non renouvelables, à une condition que ces biens de la nature soient réinvestis en capital reproductible conforme à la substituabilité de différents types de capitaux (Hartwick, 1977 et Solow, 1986). A contrario de ces arguments défendus par les néoclassiques sur le capital naturel, les économistes écologiques soutiennent la non- substituabilité entre le capital naturel et le capital créé par les hommes. Ils sont plutôt favorables à une complémentarité de ces différents types de capitaux (Georgescu-Roegen, 1971 ; Costanza et Daly, 1992 ; Constanza et al, 2012). Puisque, Georgescu-Roegen, (1971) va à travers les lois de thermodynamique évoquer le problème de dépendance du circuit économique vis-à-vis des systèmes biophysiques dans la théorie de la bioéconomie. Il montre à partir de la deuxième loi de la thermodynamique, que maintenir le stock de capital naturel constant n'est pas possible, car ces ressources naturelles de la planète qu'elles soient renouvelables ou non, vont finir par être utilisées ou dégradées. D'où, Costanza et Daly (1992) avec la théorie de l'état stationnaire suggèrent à leur tour une conservation du capital naturel comme des guides approximatifs, car, il existe une certaine condition minimale pouvant être nécessaire à la durabilité.

Ces différentes critiques soulevées par les économistes écologiques sur les questions de l'allocation des ressources naturelles vont permettre aux néoclassiques, notamment Pigou (1958), de s'interroger d'abord sur la maximisation du bien-être social. Selon l'auteur, cette maximisation sera la situation optimale de la collectivité, car dans la majorité des pays, leur développement se traduit à la fois par une population croissante et l'augmentation de la consommation de ce capital naturel. Ce qui lui permet de poser les bases concernant les problèmes des externalités négatives en 1920. Les modalités principales de cette internalisation sont : la tarification et l'émission de droit à polluer tout en indiquant également que l'effet externe se présente comme une divergence entre le produit marginal social et privé.

Dans ce même volet, la deuxième réponse néoclassique découle sur l'établissement des droits de propriété et la négociation marchande entre les pollueurs et les pollués quelle que soit la répartition initiale des droits entre eux (Coase, 1960). Cela permettra de résoudre l'externalité sans intervention de l'Etat en cas de nuisance ou d'externalité négative liée à l'exploitation du capital naturel. C'est ainsi, qu'il va commencer à promouvoir l'idée d'un marché de la pollution. Ce qui va permettre à Dales (1968) de pouvoir préciser certaines choses sur la définition qui manque des droits de propriété concernant les ressources naturelles qui sont à l'origine de l'existence des effets externes nécessitant ainsi un marché des droits à polluer. D'où, le débat entre Pigou et Coase va être éteint par Beaumais et Chiroleu-Assouline (2001) et Chiroleu-Assouline (2015) qui prônent que l'Etat puisse intervenir par incitation tout en promouvant les instruments conformes au marché, tels que : les droits de propriété sur la faune et la flore, ainsi que les taxes carbones pour l'environnement. En plus, ce concept des effets externes a été élargi par celui des externalités transfrontalières, car parmi les multiples cas de pollution, on note plusieurs postes émetteurs (les industries et l'approvisionnement en énergie) causant déjà le changement climatique actuel qui constitue l'un des problèmes d'interconnections de plusieurs pays du monde (Hanley et al, 2013).

Cette théorie va connaitre également, un certain nombre de critiques parmi lesquelles, Passet (1996) en analysant l'héritage mécanique de Newton, soulève certaines limites tout en disant qu'à l'intérieur du cadre de pensée développementiste, il n'y a pas de bonne solution pour remplacer la méthode de l'internalisation: la voie réglementaire est peu efficace. Harribey (1997) reprend ces critiques en démontrant ses arguments à travers trois controverses théoriques de l'allocation des ressources naturelles dans le modèle néoclassique d'équilibre général en évoquant tout premièrement, l'impossibilité de réaliser un optimum de Pareto à cause des effets externes qui existent. Deuxièmement, la remise en cause de l'unicité d'équilibre et de l'optimum dû au problème de redistribution des revenus. Enfin, troisièmement les effets négatifs de l'environnement sont dus aux coûts et avantages internalisés. C'est alors que survient l'analyse coût-avantage développée par

Nordhaus (1977)[3]. Or, les arguments développés par Nordhaus vont susciter un certain nombre de critiques venant des économistes écologistes comme Adaman et al. (2002) soutenus par Spash (2007). Selon ces auteurs, la détermination ou non d'une activité pouvant permettre de lutter contre les conséquences des différents postes émetteurs sur le changement climatique est erronée dès lors que l'on fait recours à l'analyse coût-avantage. En plus de cela, la méthode d'évaluation de l'analyse coût-avantage a déjà montré lusieurs limites faces aux grands problèmes environnementaux (Funtowicz et Ravetz, 1994).

La partie empirique est caractérisée par plusieurs travaux analysant la relation entre les différents facteurs socio-économiques et le changement climatique, et surtout à travers son indicateur CO_2. Ces travaux partent des contributions de Nordhaus (1977) aux Etats-Unis à partir de ses modèles DICE/RICE tout en montrant que la croissance, l'agriculture, la population et la déforestation ont des effets sur le changement climatique. En dehors des modèles d'équilibre général, on trouve plusieurs travaux qui utilisent d'autres modèles macroéconomiques tel que le modèle SVAR (Vecteur AutoRegressif Strutural) et microéconomiques à partir des données primaires. C'est d'ailleurs le cas aux Etats-Unis d'une étude de Soytas et al. (2007), qui utilise les modèles macroéconomiques sur la période allant de 1960 à 2004. Dans leurs travaux, les auteurs examinent les problèmes de causalité entre le revenu par habitant, la consommation d'énergie et des émissions de CO_2. Après modélisation en série chronologique à partir d'un modèle vectoriel autorégressif (VAR), ils trouvent que la consommation d'énergie cause bel et bien l'augmentation des émissions de CO_2. Par contre, la croissance économique n'est pas une solution pour l'environnement, car il ne cause pas au sens de granger les émissions de CO_2. Ces même résultats ont été également obtenus en Tunisie à partir des données annuelles sur la période 1970-2008 par Essaber-Jouini (2012) et ce, à travers un modèle vectoriel à correction d'erreur (VECM).

Dans le même élan d'esprit, on a les travaux de Coulibaly (2014) et ceux de Sotamenou et Nguepdjio (2019) portant sur le lien croissance, consommation d'énergie et environnement respectivement dans les pays de l'UEMOA et au Cameroun. Coulibaly (2014) en mobilisant la méthode SVAR, trouve tout d'abord, dans ses recherches qu'à long terme, l'énergie et la croissance sont des sources d'émissions de CO_2 dans la sous-région. Alors que, les chocs énergétiques et les chocs de pollution ne sont pas symétriques dans la zone UEMOA. Puisque, dans ses calculs, les cycles de l'énergie et des émissions de CO_2 sont corrélés, mais à un degré moindre. Ce qui lui permet de déduire de ces résultats que la zone UEMOA n'est pas encore une zone énergétique et environnementale optimale ou du moins aboutie. Par contre, Sotamenou et Nguepdjio (2019) ont utilisé la technique ARDL. Les résultats obtenus montrent qu'à long terme la consommation d'énergie n'a pas de conséquence sur l'augmentation des émissions de CO_2, mais à court terme, la consommation d'énergie et la croissance économique avaient des effets négatifs sur la dégradation de l'environnement au Cameroun. Sans oublier dans cette même lignée, les travaux de Nkengfack et Kaffo Fotio (2014) qui ont travaillé sur les effets de la croissance économique sur les émissions de CO_2 dans quatre (4) pays du Bassin du Congo sur une période allant de 1978 à 2012. Les résultats obtenus à travers la technique ARDL indiquent que la croissance économique, la consommation d'énergie, la densité de la population, les activités industrielles accroissent les émissions de CO_2 dans ces pays, mais la consommation d'énergie et des activités industrielles en RDC n'ont pas d'impact sur les émissions de CO_2.

Concernant les modèles microéconomiques, on a seulement les travaux de Wolff et al. (2018) portant sur la combinaison des effets de la déforestation et les changements climatiques utilisant une analyse d'arbre de régression optimisée. Ils intègrent des mesures spatiales de la déforestation et de la température après des enquêtes sociales approfondies dans près de 500 villages de Kalimantan (Bornéo indonésien). Leurs résultats mettent en évidence le rôle des forêts dans la régulation du climat local. Ce service écosystémique gravement menacé est pourtant de plus en plus vital pour éviter les

[3] Voir l'introduction 3e paragraphe

maladies dues à la chaleur et permettre l'adaptation au changement climatique mondial (Wolff et al. 2018).

En résumé, l'enseignement que nous pouvons tirer de cette revue est que théoriquement, il existe une abondante littérature portant sur les facteurs socio-économiques dont les biens de la nature et les problèmes environnementaux sont au centre des débats. Il est constaté que, c'est l'approche néoclassique qui tente de mieux expliquer le problème de l'incidence des facteurs socio-économiques sur le changement climatique. Pour les travaux empiriques, il est à noter de façon générale que plusieurs travaux sont consacrés non seulement au modèle d'équilibre général, mais aussi aux modèles macroéconomiques tels que les modèles VAR et VECM, en examinant souvent le problème de l'augmentation des émissions de CO_2. Pour ce faire, cette revue de littérature nous permet de reposer nos analyses sur le modèle théorique néoclassique, mais surtout de faire appel à d'autres outils économétriques, notamment la méthode à équations simultanées qui est rarement utilisée dans ce type de travaux.

2. Méthodologie

2.1. Le modèle

De nombreux travaux ont été consacrés au modèle de Solow (1956) pour analyser la relation entre l'économie et l'environnement de façon générale. Cependant, ce même modèle a été revu par Brock et Taylor (2004) nommé «modèle augmenté de Solow». En débutant par une fonction de production concave à rendement d'échelle constant de type Cobb Douglas, mais en admettant également que dans l'économie, le processus de production engendre de la pollution H (Coulibaly, 2014) selon l'équation : H= ΩF (K, BL) (1)

Où F est la taille de l'économie, Ω les techniques de production, B le niveau de technologie, K le facteur capital et L le facteur travail. Le taux de croissance des émissions de polluants est :

$$\frac{\dot{H}}{H} = \frac{\dot{\Omega}}{\Omega} + \frac{\dot{F}}{F} \qquad (2)$$

L'économie F croît au taux $\frac{\dot{F}}{F} = (\delta + n + \mathcal{Z})$, où l'économie crée un secteur de dépollution influencé par les techniques de production dont le taux de croissance est $\frac{\dot{\Omega}}{\Omega} = -\mathcal{Z}_A$[4]. Dans ces conditions, l'équation (2) peut se réécrire comme suit : $\frac{\dot{H}}{H} = \mathcal{Z}_H = \delta + n + \mathcal{Z} - \mathcal{Z}_A$ (3)

Or, en s'inspirant du modèle d'impact de la pollution de Copeland et Taylor (1994), Brock et Taylor (2004) sont parvenus, après de multiples développements[5], à l'équation (4) ci-après :

$$\left(\frac{1}{N}\right)\left(\log\frac{e_t^c}{e_{it-N}^c}\right) = \beta_0 + \beta_1 \log(e_{it-N}^c) + \beta_2 \log(\mathcal{Z}_{Ai}) + \beta_3 \log(s_i) + \beta_4 \log(1-\theta)_i + \beta_5 \log(\delta + n + \mathcal{Z})_i + \zeta_{it} \qquad (4)$$

Donnant ainsi la possibilité à Brock et Taylor de modifier la forme de l'équation (4) en intégrant certaines variables importantes qui affectent positivement les émissions de GES dans l'atmosphère, on obtient : $\text{Log}\,(E/Y)_{it} = \gamma_{i0} + \gamma_{i1}\log(w_{it}^p) + \gamma_{i2}\text{Temps} + \xi_{it}$ (5)

$(E/Y)_{it}$ représente les émissions par tête ; w_{it}^p est un indicateur pouvant prendre en compte d'autres variables et $\mathcal{Z}_{Ai}$, une estimation du progrès technique spécifique à chaque pays en baisse qui est donnée par γ_{i2}.

[4] Voir Copeland et Taylor (1994)
[5] Voir annexe pour implémentation complète du modèle.

En partant de l'équation (5), nos équations à des fins d'estimation sont spécifiquement définies en un modèle récursif à équations simultanées, avec comme variables (émissions de CO_2 par tête, températures, précipitations, croissance de la population totale, consommation de l'énergie, valeurs ajoutées industrielle et agricole, investissements, superficies forestières et PIB mondial) dans les trois équations suivantes :

$$(\mathrm{CO_2/habitant})_{\mathrm{it}} = \gamma_0 + \gamma_1 \mathrm{Cpoptot_{it}} + \gamma_2 \log(\mathrm{PIBmonde_{it}}) + \gamma_3 \mathrm{Superfi_forest}_{i.t} + \gamma_4 \mathrm{Ct°d'énerg_{it}} + \gamma_5 \mathrm{Fbcf_pib_{it}} + e_{\mathrm{it}} \quad (6)$$

$$(\mathrm{T°C})_{\mathrm{it}} = \alpha_0 + \alpha_1 \mathrm{Cpoptot_{it}} + \alpha_2 \log(\mathrm{PIBmonde_{it}}) + \alpha_3 \mathrm{Fbcf_pib_{it_{it}}} + \alpha_4 \mathrm{Industrie_{it}} + \alpha_5 \mathrm{CO_{2it}} + \mu_{\mathrm{it}} \quad (7)$$

$$(Precip)_{\mathrm{it}} = \partial_0 + \partial_1 \mathrm{Cpoptot_{it}} + \partial_2 \log(\mathrm{PIBmonde_{it}}) + \partial_3 \mathrm{Fbcf_pib}_{i.t} + \partial_4 \mathrm{Valajagr_{it}} + \partial_5 \mathrm{CO_{2it}} + \partial_6 \mathrm{T°C_{it}} + \varepsilon_{\mathrm{it}} \quad (8)$$

Où, e_{it}, μ_{it} et $\varepsilon_{\mathrm{it}}$ sont respectivement les termes d'erreur pour chaque variable endogène [CO_2, les températures T°C et les précipitations (precip)]. Toutefois, les différentes variables utilisées, symboles et signes attendus des coefficients sont consignées dans le tableau 1 ci-après.

Tableau 1 : Présentations des variables, symboles et signes attendus des coefficients

Variables	Symboles	Signes attendus des coefficients
Croissance de la population	Cpoptot	Positif (+)
PIB mondial	PIBmonde	Positif (+)
Superficies forestières	Superfi_forest	Négatif (-)
Consommation de l'énergie	Ct°d'énerg	Positif (+)
Investissements	Fbcf_pib	Positif (+)
Valeur ajoutée des Industries	Industrie	Positif (+)
Valeur ajoutée agricole	Valajagri	Positif (+)
Emissions du Co_2	Co_2	Positif (+)
Températures	T°C	Positif (+)

Source : Auteur à partir de la littérature

2.2. La méthode d'estimation

Généralement, la méthode connue dans l'explication des relations entre les différents indicateurs étudiés, est la méthode des moindres carrés ordinaires. Toutefois, cette méthode conduit à des résultats incohérents et, ses estimations sont souvent entachées des biais lorsque les indicateurs étudiés sont déterminés de façon conjointe (Stock & Watson, 2011). C'est ainsi que la constatation dans le temps et dans l'espace de la prédominance de cette méthode va conduire Kim et al. (2007) dans leurs recherches empiriques, à montrer qu'il existe maintenant des méthodes alternatives capables d'estimer plusieurs équations au même moment à travers un modèle à équations simultanées. Parmi ces méthodes, il y a celles qui sont estimées à partir de la méthode des triples moindres carrés (3LS) ou encore à partir de la méthode des doubles moindres carrés (2LS) (Wooldridge, 2008).

Dans le cadre de cet article, nous avons retenu comme technique d'estimation, la méthode des 3LS avec la fonction Conditional (recursive) Mixed-Process (CMP), pour la correction du problème d'hétéroscédasticité. Elle est retenue tout simplement, parce qu'elle est la technique d'estimation d'équation en système la plus courante qui produit des estimateurs plus efficaces que 2LS

(Wooldridge, 2008). Toutefois, le test de suridentification de Sargan/Hansen sur les restrictions pour la validation des équations sera mis en évidence. Ce test suit une probabilité de Khi-deux avec le non rejet de H_0 pour pouvoir valider les équations à estimer.

La présence d'une hétéroscédasticité dans un modèle ayant pour conséquence d'affecter aussi bien les erreurs de chaque équation, que les tests d'hypothèse des coefficients de régression (Hill et al., 2012), nous emmène à effectuer dans cette procédure le test de Beusch-Pagan LM pour tester l'hétéroscédasticité globale du système (Shehata, 2011). Les résultats du test donnent une statistique 263,2960 et une P-value de 0,000. D'après ces résultats du test d'hétéroscédasticité obtenus à partir des estimations des 3LS, l'hypothèse nulle est alors rejetée évoquant ainsi une absence d'hétéroscédasticité globale du système. Dès lors, dans nos estimations, nous retenons les résultats en 3LS (CMP) estimé avec une technique proposée par Roodman (2007) dont la fonction CMP est construite sur l'estimateur de Maximum de Vraisemblance (MV). Il faut dire sans doute que les 3LS (CMP) avec MV produisent des erreurs cohérentes de chaque équation avec une hétéroscédasticité.

2.3. Sources de données et analyses descriptives

L'échantillon retenu pour notre étude est composé de 6 pays à savoir Cameroun, Centrafrique, Congo, République démocratique du Congo, Guinée Equatoriale et Gabon. De ce fait, notre échantillon va couvrir une période de trente-quatre (34) ans, allant de 1985 à 2018. Toutes les données utilisées sont extraites des bases de données de la Banque Mondiale 2019 disponibles sur le site databank.banquemondiale.org/databases. La présentation de l'analyse des statistiques descriptives est donnée dans le tableau 2 ci-dessous :

Tableau 2 : Statistiques descriptives

Variables		Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum	Observations
CO_2 (tonnes métriques par habitant)	Ensemble pays	1,31	1,99	0,01	8,66	N=204
	Inter pays		1,71	0,05	3,87	n=6
	Intra pays		1,22	-1,74	6,85	T=34
Températures (°C)	Ensemble pays	24,90	0,44	23,28	26,11	N=204
	Inter pays		0,28	24,44	25,22	n=6
	Intra pays		0,35	22,96	25,79	T=34
Pluviométrie (Millimètres)	Ensemble pays	138,22	24,77	102,73	248,08	N=204
	Inter pays		23,79	112,70	179,35	n=6
	Intra pays		11,81	87,04	206,94	T=34
Croissance de la population (%)	Ensemble pays	2,87	0,79	0,20	5,97	N=204
	Inter pays		0,71	1,78	4,00	n=6
	Intra pays		0,45	1,29	4,84	T=34

Source : *Auteur à partir des résultats obtenus sur Stata*

D'après ce tableau 2, les statistiques descriptives que nous avons obtenues montrent l'évolution des indicateurs du changement climatique retenus dans les pays du Bassin du Congo à savoir les émissions de CO_2 par habitant, les températures et les précipitations. Les émissions de CO_2 par habitant sont en moyenne de 1,31 tonne métrique, 24,90°C en moyenne pour les températures et une moyenne de 138,22 mm des précipitations dans la sous-région. En ce qui concerne les facteurs socio-économiques, il ressort des résultats qu'au niveau global, la croissance de la population dans la sous-région sur la période 1985-2018 se situe à une moyenne de plus de 2,87 %.

Hormis cette présentation des caractéristiques de tendance centrale, il y a également les dispersions autour de la moyenne de tous ces indicateurs suivant les valeurs des écarts-types issus des résultats du tableau 3 des statistiques descriptives ci-dessus. Les résultats des écarts-types montrent que, ces indicateurs dans l'ensemble se caractérisent par une faible dispersion autour de la moyenne.

3. Présentation et interprétation des résultats

Dans cette partie, on va d'abord faire la présentation des résultats, et ensuite passer à la phase d'interprétation des résultats.

3.1. Présentation des résultats

Les résultats de l'incidence des facteurs socio-économiques sur le changement climatique dans les pays du Bassin du Congo sont présentés dans le tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3 : Les résultats du modèle récursif à équations simultanées (3LS-CMP)

	(3LS CMP)	*(3LS CMP)*	*(3LS CMP)*
Variables endogènes	Emissions du Co_2	Températures	Précipitations
Croissance de la population	1,131*** (7,07)	-0,012*** (-5,52)	0,044*** (4,72)
PIB mondial	0,385* (1,78)	0,011*** (5,16)	-0,030*** (-2,69)
Superficies forestières	-0,613*** (-3,92)		
Consommation de l'énergie	-0,153*** (-9,89)		
Formation brut de capital fixe	-0,005 (-1,29)	0,0001** (2,54)	0,002*** (11,52)
Valeur ajoutée des industries		-0,0001*** (-2,72)	
Valeur ajoutée agricole			-0,002*** (-6,80)
Emissions du Co_2		0,007*** (7,35)	0,019*** (2,75)
Températures			0,295*** (2,64)
Constante	-12,501* (-1,82)	2,893*** (43,17)	4,745*** (4,54)
Nombre de pays	6	6	6
Nombre d'observations	204	204	204
Hansen/Sargan ; P-value	*8,027/0,154*		
Statistique de Wald	*2331,9****		

Source : Auteur à partir des résultats obtenus sur Stata

Notes: Les valeurs absolues des t-student sont entre les parenthèses sous les coefficients. Les seuils de significativité retenus sont respectivement de 1 % (***), 5 % (**) et 10 % (*).

L'analyse des résultats issus du tableau 3, le test de Hansen/Sargan montre que les équations sont bien spécifiées. De ces estimations issues des 3LS[6] et 3LS (CMP), la différence au niveau des signes et significativités est négligeable, seulement au niveau des températures où, on constate cette petite différence des signes. Ce qui nous permet de tirer un enseignement sur ces facteurs socio-économiques. En effet, la croissance économique mondiale, la croissance démographique et les superficies forestières des pays du Bassin du Congo ont des incidences négatives et significatives directes sur les émissions du CO_2 dans la sous-région. Alors que, les températures et les précipitations

[6] Voir tableau 4 en annexes

ne sont affectées que de façon indirecte par certains facteurs socio-économiques et ce, par le biais des émissions du CO_2.

3.2. Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats de l'incidence des facteurs socio-économiques sur le changement climatique dans les pays du Bassin du Congo va se faire suivant deux phases. Dans la première phase, les discussions porteront sur les émissions du CO_2 dont les facteurs socio-économiques ont des incidences négatives directes. Alors que, dans la seconde phase les discussions sont essentiellement axées sur l'incidence négative indirecte de ces facteurs sur les températures et les précipitations.

- Les conséquences négatives directes des facteurs socio-économiques sur le changement climatique

Dans la première phase, les résultats issus du modèle à équation simultanée à trois étapes montrent que, *la croissance démographique, la croissance économique mondiale et la diminution des surfaces forestières de ces pays influencent négativement les émissions de CO_2*. En effet, les deux premières variables présentent des coefficients positifs et la dernière variable quant à elle, a un coefficient négatif. Cependant, elles sont toutes significatives au seuil de 10 %.

Actuellement, les résultats suggèrent qu'au vu du secteur industriel encore embryonnaire, la consommation d'énergie ne peut être considérée comme source directe de l'augmentation des émissions de CO_2 dans l'atmosphère. En effet, les résultats obtenus à travers l'équation des émissions du CO_2 montrent que les facteurs socio-économiques à fortes intensités carbones ont chacun des coefficients de 1,131 ; 0,385 et -0,613 respectivement pour la croissance de la population totale, la croissance économique mondiale et les superficies forestières. Ce qui revient à dire que l'augmentation de 1 point de chacun de ces facteurs évoqués ci-dessus entrainerait une hausse des émissions de CO_2 de 1,131 tonne métriques par tête pour la croissance de la population totale de la sous-région ; elles vont être augmentées de 0,385 tonne métriques pour la croissance économique mondiale ; de -0,499 tonne métriques pour la diminution des forêts et de 0,613 tonne métriques pour les superficies forestières des pays du Bassin du Congo.

Nos résultats sont conformes à ceux obtenus par Sotamenou et Nguepdjio (2019), tout comme ceux de Nkengfack et Kaffo Fotio (2014) dont les premiers travaux concluent qu'une augmentation de la croissance économique était une source de pollution au Cameroun à court terme tandis que, la consommation de l'énergie à long terme n'affectait pas l'augmentation du CO_2. Les deuxièmes travaux montrent par contre que l'augmentation de la population et de la croissance économique se traduisent par une hausse des émissions de CO_2 dans quatre (4) pays du Bassin du Congo. Les arguments qui nous poussent à qualifier ces trois (3) facteurs de principaux émetteurs dans la dégradation de l'atmosphère sont, premièrement la forte croissance démographique dans les pays du Bassin du Congo et, deuxièmement le développement industriel qui est important dans les pays du Sud.

Par ailleurs, les résultats liés à la consommation d'énergie avec un coefficient affecté du signe négatif et significatif au seuil de 5%, vont donc dans le sens contraire de nos attentes, car au regard de la forte dépendance de ces populations aux énergies (les habitudes culturelles des populations, qui préfèrent utiliser le bois que d'autres sources d'énergie), nous croyions que leurs pratiques devraient avoir des effets négatifs sur les émissions de CO_2. Voilà ce qui prouve au contraire l'absence d'influence de la consommation d'énergie sur l'augmentation des émissions de CO_2. La désindustrialisation connue par la majorité de ces pays durant la période 1986 à 1994 est également l'une des explications de ces faits. Il en résulte que, les pays du Bassin du Congo sont dans une continuité dynamique pour

développer les activités économiques moins polluantes notamment dans la promotion d'une économie verte, voire numérique.

- Les conséquences négatives indirectes des facteurs socio-économiques sur le changement climatique

Dans la seconde phase, il ressort de ces résultats, que *le PIB mondial influence négativement les températures après avoir affecté les émissions de CO_2 avec la complicité des investissements* d'une part. Cependant, *les précipitations sont influencées négativement par les facteurs socio-économiques propres à ces pays par l'intermédiaire des émissions de CO_2 et des températures* d'autre part.

Les résultats nous indiquent sur les températures, que la croissance du PIB mondial et les températures dans les pays du Bassin du Congo sont fortement liées et ce, de façon positive. De plus, il est à noter également que le secteur industriel encore embryonnaire ne constitue pas un secteur à forte intensité en matière de pollution pour être à l'origine des modifications des températures dans les pays du Bassin du Congo.

La croissance économique mondiale influence négativement et de manière considérable la modification des températures. Une augmentation de 1 % du PIB mondial, entrainerait une augmentation des températures de 0,011°C. Contrairement aux émissions du CO_2, les investissements accompagnent le PIB mondial dans la modification des températures à hauteur de 0,0001 °C dès qu'ils augmentent de 1 %. Ces résultats sont conformes aux objectifs fixés lors des accords du protocole de Kyoto 2008-2012 qui attirent l'attention des gouvernements sur la limitation des températures en dessous de 2°C, y compris les travaux de Wolff et al. (2018) qui pensent que la modification des températures expose des millions de personnes à un risque accru de maladies dues à la chaleur. Cela s'explique par le simple fait que, l'augmentation des températures à première vue est liée à la hausse des émissions de Gaz à Effet de Serre dans l'atmosphère, car une hausse des émissions du CO_2 entrainerait nécessairement une augmentation des températures.

Tandis que, les précipitations quant à elles, influencées aussi bien par les émissions de CO_2 que les températures, accusent une influence très endogène des facteurs socio-économiques. Parmi ces indicateurs endogènes de ces économies, à l'exception du PIB mondial qui n'a pas d'effet sur les précipitations, on note que la croissance de la population totale et les investissements influencent négativement et significativement la modification des précipitations dans la sous-région. En effet, sur l'équation des précipitations, il ressort des résultats obtenus que, les variables population et investissements sont affectés de coefficients de signes positifs. Cela signifie qu'une augmentation de 1 point de chacune de ces variables évoquées entrainerait une modification du nombre de pluie par jour de plus 0,044 et 0,002 respectivement pour l'augmentation de la population et les investissements dans ces pays du Bassin du Congo. En somme, on peut expliquer que la modification des précipitations ne soit pas imputable au secteur agricole dans les pays du Bassin du Congo tout simplement, parce que dans tous ces pays, la transformation des différents produits agricoles locaux est faible.

Conclusion

Le présent article avait pour objectif d'analyser l'incidence de facteurs socio-économiques sur le changement climatique dans pays du bassin du Congo. Deux résultats essentiels expliquent cette analyse : premièrement, la croissance démographique, le PIB mondial et les superficies forestières de ces pays ont des effets négatifs directs sur l'augmentation des émissions de CO_2 ; deuxièmement, il existe des effets négatifs indirects de la formation brute de capital fixe sur les températures ; de la population totale et des investissements sur les précipitations dans les pays du Bassin du Congo.

Les résultats obtenus dans cet article sont pour la plupart conformes à nos attentes concernant l'ensemble des pays du Bassin du Congo. Toutefois, analyser l'incidence des facteurs socio-économiques directs sur les précipitations paraît difficile, mais par contre l'utilisation de la croissance du PIB mondial comme l'un des facteurs socio-économiques dans le contexte des pays du Bassin du Congo contribue inéluctablement à l'augmentation des émissions du CO_2 et des températures. Ce qui devrait encourager la communauté internationale de se préoccuper davantage des problèmes environnementaux, bien que les facteurs socio-économiques propres à ces pays contribuent également au changement climatique. A l'issue de ces résultats, quelques implications de politique peuvent être envisagées.

Il serait nécessaire que les pays du Bassin du Congo soient accompagnés par la communauté internationale dans la gestion durable des forêts, afin que les activités économiques dans le long terme, soient également développées sans risque de dégradation environnementale. Promouvoir le développement économique en parfaite harmonie avec l'économie verte serait indispensable compte tenu des objectifs du développement durable dans les pays du Bassin du Congo.

Bibliographie

Adaman, F., Devine, P. et Özkaynak, B. (2002), *Marketable permits : A critique from an ecological economics point of view*, 7th biennal conference of the international society for ecological economics, Université du Centre, Sousse, Tunisie, 6-9 mars.

Barro, R. J. (1991), Economic growth in a cross section of countries, Quarterly Journal of Economics, Vol. 86, pp 407 – 443

Beaumais, O et Chiroleu-Assouline, M., (2001), *Économie de l'environnemen*, Éd.Bréal, 240 pages.

Brock, W. A. and Taylor, M. S., (2004), The Green Solow Model, *Journal of Economic Growth,* Vol 15, p 127–153.

Chiroleu-Assouline, M., (2015), La fiscalité environnementale en France peut-elle devenir réellement écologique ? Etat des lieux et conditions d'acceptabilité, *Revue de l'OFCE*, n°139, p 131-165.

Coase, R. H., (1960), The problem of social cost, *The Journal of Law and Economics*, 3^e^ Année.

Copeland, B. R. and Taylor, M. S., (1994), North-South Trade and the Global Environment, *Quarterly Journal of Economics,* 109:755-787.

Costanza, R et Daly, H. E., (1992), Natural capital and sustainable development, *Conservation Biology*, 1992, 6: p. 37-46.

Costanza, R., Cumberland, J., Daly, H., Goodland, R., and Norgaard, R., (2012)., *An Introduction to Ecological Economics*, 2nd Ed. Boca Raton, Florida: CRC Press.

Coulibaly, S. N., (2014), *Energie, croissance et environnement dans les pays de l'UEMOA*, Economies et finances, Université Rennes 1, thèse du 16 Décembre 2014.

Dales, J. H., (1968), *Pollution Property and Prices, an Essay in Policy Making and Economics*, University of Toronto Press, Toronto.

Daly, H. E., (1991), *Steady State Economics*, 2nd ed., Washington, D.C.: Island Press.

Daly, H. E., (2008), *A Steady-State Economy,* UK, Sustainable Development Commission.

De Wasseige, C., Tadoum, M., Eba'a, R., et Doumenge, C., (2016), *Ph,Les forêts du Bassin du Congo-Etat des Forêt*s 2015, Weyrich. Belgique.

Essaber-Jouini, S., (2012), Croissance Economique, Emissions De Polluants Et Consommation D'Energie En Tunisie, *Presses universitaires du Septentrion, 2012*, p. 285-300.

Funtowicz, S. O et Ravetz, J. R., (1994), The worth of a songbird: ecological economics as a post-normal science, *Ecologycal Economics,* Vol. 10, n°3, p. 197-207.

Georgescu-Roegen, N., (1971), *The Entropy Law and the Economic Process*, Cambridge, MA: Harvard UP, 457 pages.

GIEC., (2018), *Rapport spécial sur le réchauffement climatique*, Incheon, République de Corée, le 6 octobre 2018.

GIEC., (2021), *Changement climatique 2021: les éléments scientifiques,* Genève, le 9 Août 2021.

Grossman, G.M., et Krueger, A. B. (1995), Economic Growth and the Environment*, Quarterly Journal of Economics*, Vol. 110(2), p. 353-377.

Hanley, N., Shogren, J., et White, B., (2013), *Introduction to environmental economics*, Oxford University Press Retrieved from.

Hardin, G., (1968), The Tragedy of the Commons, *Science,* 162, p. 1243-1248.

Harribey, J. M., (1997), La prise en compte des ressources naturelles dans le modèle néo-classique d'équilibre general: elements de critique, ln *"Economies et Sociétés Série Développement, croissance et progress"*, 4, F, n° 35. P. 57-70

Hartwick, J. M., (1977), Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible, *The American Economic Review*, Vol. 67, No. 5, p. 972-974.

Hill, R. C., Griffiths, W. E., et Lim, G. C., (2011), *Principles of econometrics*, 4. ed. Hoboken, N.J.: Wiley.

Hope, C., (2009), How Deep Should the Deep Cuts Be? Optimal CO2 Emissions over Time under Uncertainty *Climate Policy*, 9 (1): 3–8.

Hotelling, H., (1931), The economics of exhaustible resources, *Journal of Political, 39, :137-175.*

Hugon, P., (2005), Environnement et développement économique : les enjeux posés par le développement durable*, Revue internationale et stratégique, 4, n° 60.* p. 113-126.

Islam, N. (1995): Growth empirics: A panel data approach, *The quarterly Journal of Economics*, Vol. 110, pp 1127 – 1170.

Kim, Y., Rhim, L., et Friesner, D., (2007), Interrelationships among Capital Structure, Dividends, and Ownership: Evidence from South Korea. (cover story)*, Multinational Business Review (St. Louis University)*, 15, 3, pp. 25-42

Mankiw, N. G., Romer, D et Weil, N. D., (1992), A contribution to the empirics of economic growth, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 107, pp 407 – 438.

Nkengfack, H et Kaffo Fotio, H., (2014), Effets de la croissance économique sur les émissions de CO2 dans les Pays du Bassin du Congo, *revue d'économie rurale,* p. 1-17.

Nordhaus, W. D. (2010), Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, n° 26, p. 11721-11726.

Nordhaus, W. D., (1977), Economic growth and climate: The case of carbon dioxide, *American Economic Review*, 67, 1, p. 341-346.

Nordhaus, W. D., (2019), *Le casino climatique: Risque, incertitudes et solutions économiques face à un monde en réchauffement*, Wilco, Pays-Bas, 351 pages.

Passet, R., (1996), *L'économique et le vivant*, Economica, Paris, 291 pages.

Pigou, A. C., (1958), *The economics of welfare*, London, Macmillan, 976 pages.

Pigou, A. C., (1920), Co-operative Societies and Income Tax, *The Economic Journal*, 30(118), p. 156–162.

Roodman, D., (2007), *CMP: Stata module to implement conditional (recursive) mixed process estimator*, Statistical Software Components S456882, Boston College Department of Economics, revised 02 Nov 2013.

Shafik, N. and Bandyopadhyay, S., (1992), *Economic growth and environmental quality: times series and cross-country evidence*, Background paper for the World Development Report 1992 (Washington, DC: The World Bank, 1992).

Shehata, E. A. E., (2011), *LMHREG3: Stata Module to Compute Overall System Heteroscedasticity Tests after (3SLS-SURE) Regressions*.

Solow, R. M., (1956), A contribution to the theory of economic growth, *Quarterly Journal of Economics*, LXX, p. 65-94.

Solow, R. M., (1974), The economics of resources or the resources of economics, *American Economic Review*, vol. 64, n° 2, p. 1-14.

Solow, R. M., (1986), On the Intertemporal Allocation of Natural Resources, *Scandinavian Journal of Economics* 88, pp. 141-149.

Sotamenou, J et Nguepdjio, C., (2019), Consommation d'énergie, croissance économique et émissions de Co_2 au Cameroun : une analyse de causalité, *African Integration and Development Review,* vol. 11, pp. 82-100.

Soytas, U., Sari, R., et Ewing, B., (2007), Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States, *Ecological Economics,* n° 62, pp. 482-489.

Spash, C. L., (2007), Problems in economic assessments of climate change with attention to the United States of America, *in Erickson J.D. et Gowdy J.M. (éds.), Frontiers in ecological economic theory and application, Cheltenham, Edward Elgar*, pp. 176-192.

Stern, N., (2006), *The Economics of Climate Change, The Stern Review*, Cambridge.

Stock, J. H. and Watson, M. W., (2011), *Introduction to econometrics,* 3. ed., Global ed. Harlow: Pearson.

WDI, 2019, *World Development Indicater Data Base*, World Bank, 2019.

Wolff, N. H., Masudab, Y. J., Meijaard, E., Wells, J. A et Game, E. T., (2018), Impacts of tropical deforestation on local temperature and human well being perceptions*, Global Environmental Change* 52, pp. 181-189.

Wooldridge, J. M., (2008), *Introductory econometrics: a modern approach*, 4. ed. Mason, Ohio: South-Western Cengage Learning.

World Commission on Environment and Developmen, (1987), *Our Common Future*, New York: Oxford University Press.

Annexes

Annexe 1 : Implémentation complète du modèle

$H = \Omega F(K, BL)$ (1)

Où F est la taille de l'économie, Ω les techniques de production, B le niveau de technologie, K le facteur capital et L le facteur travail. Le taux de croissance des émissions de polluants est :

$$\frac{\dot{H}}{H} = \frac{\dot{\Omega}}{\Omega} + \frac{\dot{F}}{F} \quad (2)$$

L'économie F croît au taux $\frac{\dot{F}}{F} = (n + \mathcal{Z} + \delta)$, où l'économie crée un secteur de dépollution influencé par les techniques de production dont le taux de croissance est $\frac{\dot{\Omega}}{\Omega} = -\mathcal{Z}_A$[7]. Dans ces conditions, l'équation (2) peut se réécrire comme il suit :

$$\frac{\dot{H}}{H} = g_E = n + \mathcal{Z} + \delta - \mathcal{Z}_A \quad (3)$$

Or Brock et Taylor (2004) s'en inspirent en suivant aussi le modèle d'impact de la pollution de Copeland et Taylor (1994) que les émissions du CO_2 et le capital évoluent selon les équations (4) et (5) ci-après :

$$\frac{\dot{H}}{H} = g_E + \alpha\frac{\dot{k}}{k} \quad (4)$$

$$\frac{\dot{k}}{k} = sk^{\alpha-1}(1 - \vartheta) - (n + \mathcal{Z} + \delta) \quad (5)$$

On considère α comme le taux d'épargne tel que cela a été fixé dans le modèle de Solow, s l'épargne, ϑ est l'investissement dans le secteur de dépollution et g_E est le taux de croissance globale des émissions tout au long d'une croissance soutenable. Voici donc la synthèse du modèle de Solow (1956) qui se définit suivant un système d'équations ainsi qu'il suit :

$$y = f(k)[1 - \vartheta] \quad (6)$$

$$\dot{k} = sf(k)[1 - \vartheta][\delta + n + \mathcal{Z}]k \quad (7)$$

$$e = f(k)\Omega a(\vartheta) \quad (8)$$

$k = K/BL$, $y = Y/BL$, $e = H/BL$ et $f(k) = F(k, 1)$

Ce modèle offre plusieurs possibilités pour pouvoir appréhender la croissance par un processus d'accumulation du capital, et qui, à partir de ce cadre théorique permet de trouver les outils d'analyse empiriques de la croissance et des concepts de convergence.

Partons de l'équation (1) en commençant essentiellement par développer les émissions de CO_2 en différentielle, où elles seront écrites en fonction du temps comme :

$$H = B(0)L(0)\Omega(0)a(\vartheta)\,exp[g_E\, t]k^{\alpha} \quad (9)$$

$B(0)$, $L(0)$ et $\Omega(0)$ sont les conditions initiales. A partir de l'équation (9) concernant toujours ses émissions de CO_2, tout en réécrivant maintenant les expressions des émissions du CO_2 par tête $e^c(t) = H(t)/L(t)$ et du revenu par tête $y^c(t) = F(t)[1 - \vartheta]/L(t)$. Dans ces conditions, en utilisant la notation standard, cela donne :

$$e^c(t) = \Omega(t)a'(\vartheta)y^c(t) \quad (10)$$

Où $a'(\vartheta) = a(\vartheta)/[1 - \vartheta]$. Différencier avec des rendements donnés en temps,

$$\frac{\dot{e^c}}{e^c} = -\mathcal{Z}_A + \frac{\dot{y^c}}{y^c} \quad (11)$$

Ensuite, il peut exister trois approches opérationnelles dans lesquelles l'économie peut se trouver, à partir de l'équation (11). Premièrement, elle est dans une situation régulière, où l'économie augmente d'un taux $(n + \mathcal{Z})$. Le capital par habitant converge vers son état d'équilibre et le taux de croissance des émissions de GES est obtenu en faisant la différence entre l'effet d'échelle $(n+\mathcal{Z})$ et l'effet technique $\mathcal{Z}_A$, ce qui donne $g_E = n + \mathcal{Z} - \mathcal{Z}_A$. A cet effet, $-\mathcal{Z}_A + \mathcal{Z}$ peut prendre trois résultats à savoir positifs, nul ou négatif dont les conditions d'une croissance soutenable ($g_E < 0$) sont : $\mathcal{Z} > 0$ et $\mathcal{Z}_A >$

[7] Voir aussi Copeland et Taylor (1994)

$n + \mathcal{Z}$. De plus, ils donnent une approximation par la suite du taux de croissance du revenu par tête et des émissions de CO_2 par tête sur une période de temps discret de taille N par leur moyenne tout en introduisant le logarithme, l'équation est ensuite spécifiée de la manière suivante :

$$(\frac{1}{N})(\log\frac{e_t^c}{e_{t-N}^c}) = -\mathcal{Z}_A + (\frac{1}{N})(\log\frac{y_t^c}{y_{t-N}^c}) \quad (12)$$

Deuxièmement, elle est dans une transition dynamique, c'est-à-dire hors sa situation régulière, elle évolue d'après Brock et Taylor (2004) tout en s'inspirant de Barro (1991) et Mankiw et al. (1992) en donnant également une approximation discrète de N période au taux de croissance du revenu par tête avec un modèle contenant une constante via la linéarisation par le logarithme, on obtient ainsi l'équation sous la forme :

$$(\frac{1}{N})(\log\frac{y_t^c}{y_{t-N}^c}) = b - \frac{[1-\exp^{(-\lambda N)}]}{N}(\log y_{t-N}^c) \quad (13)$$

Ici, b est une constante et $\lambda = [1-\alpha][\delta + n + \mathcal{Z}]$ est la vitesse de convergence suivant k^α du modèle de Solow.

Enfin, en additionnant les équations (12) et (13) et en remplaçant également à l'instant *t-N* ; $y_{t-N}^c = e_{t-N}/\Omega_{t-N}a'(\vartheta)$ de l'équation (10). Cela va donner après manipulation, une simple équation linéaire pertinente pour un travail empirique entre les différents pays de l'étude. Elle lie le logarithme aux émissions du CO_2 par tête à travers i pays (sur une période de temps N) avec une constante et les émissions du CO_2 de la période initiale. Ce qui explique une régression linéaire simple avec le terme erreur μ_{it} tel que :

$$(\frac{1}{N})(\log\frac{e_t^c}{e_{it-N}^c}) = \beta_0 + \beta_1\log(e_{it-N}^c) + \mu_{it} \quad (14)$$

Où $\beta_0 = \mathcal{Z} - \mathcal{Z}_A + \frac{[1-\exp^{(-\lambda N)}]}{N}\log(y^{\blacksquare}a'(\vartheta)\Omega_{t-N}, B_{t-N})$; $\beta_1 = -\frac{[1-\exp^{(-\lambda N)}]}{N} < 0$ et

$$\mu_{it} = \frac{[1-\exp^{(-\lambda N)}]}{N}\log^h\Omega_{i,t-N}, B_{i,t-N} - \Omega_{t-N}, B_{t-N}$$

Par exemple, supposons que les pays partagent dans une même sous-région un milieu ou un environnement sans pollution $y^{\blacksquare}$, alors les pays dans la conservation des ressources forestières ou des autres ressources naturelles se distinguent seulement par leur niveau de technologie initiale Ω_{t-N} et B_{t-N}.

$$\left(\frac{1}{N}\right)\left(\log\frac{e_t^c}{e_{it-N}^c}\right) = \beta_0 + \beta_1\log(e_{it-N}^c) + \beta_2\log(\mathcal{Z}_{Ai}) + \beta_3\log(s_i) + \beta_4\log(1-\vartheta)_i + \beta_5\log(n + \mathcal{Z} + \delta)_i + \mu_{it} \quad (15)$$

où $\beta_0 = \mathcal{Z} + \frac{[1-\exp^{(-\lambda N)}]}{N}\log(\Omega_{t-N}, B_{t-N})$;$\beta_1 = -\frac{[1-\exp^{(-\lambda N)}]}{N} < 0$;$\beta_2 = -1 < 0$

$\beta_3 = (\frac{\alpha}{1-\alpha})\frac{[1-\exp^{(-\lambda N)}]}{N} > 0$; $\beta_4 = [(\frac{\alpha}{1-\alpha}) + \epsilon - 1]\frac{[1-\exp^{(-\lambda N)}]}{N} > 0$;$\beta_5 = -\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\frac{[1-\exp^{(-\lambda N)}]}{N} < 0$

Finalement, depuis qu'ils reconnaissent dans la théorie que le progrès technique est une variable très importante dans le modèle, alors il devient impératif de réduire cette équation (15) en une équation de Log (E_{it}/Y_{it}) en fonction de $\mathcal{Z}_{Ai}$ qui est identique aux déterminants capables d'influencer les émissions de GES pays par pays, d'une constante et d'une tendance du temps. Puisqu'il est évident d'accepter que le progrès technique soit la variable qui affecte plus (E/Y) en fonction du temps, mais il est également important de reconnaitre qu'il n'est en effet pas la seule variable. D'où, Brock et Taylor modifient la forme de l'équation (14) en intégrant certaines variables importantes qui affectent positivement les émissions de GES dans l'atmosphère, on obtient :

$\text{Log}\ (E/Y)_{it} = \gamma_{i0} + \gamma_{i1} \log(w_{it}^{p}) + \gamma_{i2}\text{Time} + \epsilon_{it}$ (16)

$(E/Y)_{it}$ représente les émissions par tête, w_{it}^{p}, est un indicateur pouvant prendre en compte d'autres variables et $\mathcal{Z}_{Ai}$, une estimation du progrès technique spécifique à chaque pays en baisse qui est donnée par $-\gamma_{i2}$ C'est là déjà un modèle adapté suivant le cas des panels. Puisque cette approche en données de panel aide de résoudre non seulement le problème des variables omises, mais également celui de l'hétérogénéité inobservée, avec une modélisation comportant les spécificités des économies de chaque pays pris en compte (Islam, 2003).

Dès cet instant, en suivant Mankiw et al. (1992) qui introduit la croissance économique dans leur modèle et Brock et Taylor (2004) qui intègrent les émissions du CO_2 à la place de la croissance dans leur modèle. Nous allons donc dans notre travail remplacé $(E/Y)_{it}$ par un vecteur des variables endogènes à chaque équation estimable. Le CO_2 par tête est maintenu comme variable environnemental dû au réchauffement climatique dans l'équation spécifique de notre modèle comme cela était chez Brock et Taylor.

Annexe 2 : Tableau 4, les résultats du modèle récursif à équations simultanées (3LS)

	(3LS)	***(3LS)***	***(3LS)***
Variables endogènes	Emissions du CO_2	Températures	Précipitations
Croissance de la population	1,133***	-0,012***	-0,117**
	(7,36)	(-6,47)	(-2,40)
PIB mondial	0,406**	0,010***	0,099**
	(1,97)	(4,72)	(2,22)
Superficies forestières	-0,625***		
	(-2,98)		
Consommation de l'énergie	-0,153***		
	(-8,48)		
Formation brut de capital fixe	-0,005	0,00009*	0,002***
	(-1,38)	(1,88)	(6,38)
Valeur ajoutée des industries		-0,0001	
		(-1,47)	
Valeur ajoutée agricole			-0,001
			(-1,55)
Emissions du CO_2		0,007***	0,112***
		(5,01)	(4,05)
Températures			-11,854***
			(-3,28)
Constante	-13,157**	2,914***	40,04***
	(-2,03)	(41,41)	(3,82)
Nombre de pays	6	6	6
Nombre d'observations	204	204	204
Hansen/Sargan ; P-value	*8,027/0,154*		